

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

久保 賢明

本論文は「直噴エンジン用燃料噴射ノズル内流れと噴霧形成メカニズムに関する研究」と題し、5章より成っている。

自動車エンジンの燃費低減と排気性能向上を両立する直接噴射式エンジンを実現するためには、その主要素である噴射弁から噴射される噴霧の改善が共通かつ、きわめて重要な設計課題となっている。しかし、これまで噴霧改善にあたっては噴霧形成の物理メカニズムとその設計方法が必ずしも明らかではなかった。そこで、本研究ではノズル内流れ解析および噴霧解析に関する基盤技術を開発し、それらを用いてガソリンエンジンとディーゼルエンジンにおいて顕在化している課題を明らかにすることを目的とした。

まず、第1章において、本研究の背景となった直接噴射式エンジンの噴射弁と噴霧形成メカニズムに関する研究開発の経緯を述べた後、現状の主要な課題を挙げた。

第2章では、本研究において導入、開発したノズル内流れ解析および噴霧解析に関する基盤技術について解説している。まず、数値シミュレーションに関してノズル内流れと噴霧流れの連成解析技術を新たに構築した。それぞれの要素流れに対しては汎用流れ解析コードを基盤として、ノズル内流れにおいてはキャビテーション発生を考慮した二相流モデル（VOFモデル）を、噴霧流れにおいては噴霧形成メカニズムを解析するために液膜分裂、液滴変形分裂、液滴衝突合体モデルを導入している。計測技術に関しては、PIV（粒子画像計測）を用いた噴霧流速計測、可視化モデルを用いたノズル内流れの流速計測およびキャビテーション観測をエンジン噴射弁に対して導入開発している。

第3章では、上記の解析基盤技術をガソリン直噴エンジン用スワールノズルに適用して、噴霧形成メカニズムの解明とその改善設計を試みている。まず、スワールノズルの従来の設計手法による予測精度の限界を述べ、特に、流出部での液膜厚さの正確な評価が精度向上に重要であることを指摘した。これに対して、本研究では、ノズル出口部の噴霧流速をPIVにより直接計測して液膜厚さのデータを得るとともに、キャビテーションを考慮したノズル内流れの数値シミュレーションが精度の良い予測を与えることを検証した。さらに、PIVによる噴霧および周囲気体の流速計測結果から噴霧先端の到達位置と流速の関係を明らかにし、大気圧下での噴射直後の急激な流速低下の後に変化の平坦な領域が、背圧下では観察されないという顕著な知見を得た。これらの結果から、従来明らかではなかった背圧下での「噴霧のしぼみ」現象メカニズムに対して、背圧下では気体密度が高いために噴霧から周囲気体への運動量変換が増加して噴霧速度を急速に奪うこと、その結果、大気圧下では噴霧後半で循環流れが噴霧を輸送し噴霧距離を伸ばす働きをするのに対して、背圧下では循環流れが逆に噴霧前半で噴霧を中心部に引きこむように作用する、という合理的な考察を得ている。上記の現象メカニズムを考慮した数値シミュレーションの結果も実験結果を良く予測再現し、その妥当性が検証された。

これらの結果のもとに噴霧しぼみの少ないノズル形状としてテーパ付ノズルが新たに提案され、ノズル内の液膜厚さがテーパ側で増加することにより噴霧流量がテーパ側に偏り、その結果としてテーパ側での噴霧角度が大きく噴霧流速の低下が緩やかになること、また、流量の多いテーパ側では背圧下での噴霧しぼみは生じず噴霧角度はやや増加する傾向にあることが検証された。一方、高燃圧での噴霧微粒化と流動特性については、ペネトレーション（噴霧貫徹力）の増加は主に周囲気体の運動量増加による噴霧後半での噴霧輸送の促進によって得られること、その効果によって高燃圧では背圧下での噴霧しぼみは小さく、さらにテーパ付ノズルでは噴霧広がり角の増加も見られることを明らかにした。

第4章においては、ディーゼルエンジン用マルチホールノズルの噴霧形成、特にノズル孔間の噴霧ばらつきの問題を取り上げ、メカニズム解明と改善設計を試みている。従来の仮説検証として、針弁偏芯によるノズル内流れの変化を可視化モデルによるキャビテーション観察、および、拡大モデルによる流速計測によって詳細に調べ、その結果、サックなしノズルでの針弁偏芯時の噴霧ばらつきは偏芯側のノズル内にのみ旋回流が生じて噴霧が広がるのに起因すること、ノズル内のキャビテーションが流れに強い影響を与えていることなどを明らかにした。また、これらの現象メカニズムを考慮した数値シミュレーションにおいては、定常計算にて噴霧ばらつきを再現できることを示すとともに、針弁開時の過渡応答を考慮した非定常計算では針弁開度が小さき初期のノズル内流動の偏りがその後も維持され噴霧ばらつきを助長する可能性があるという設計上重要な知見を新たに得ている。さらに、数値シミュレーション結果から、針弁開時のごく初期に針弁偏芯を増大する方向の強い流体力が加わることを見出し、これが針弁偏芯および噴霧ばらつきを生じる一因となることを指摘した。針弁偏芯の抑制に効果があるとされるスリーブ付ノズルに対して数値シミュレーションを適用した結果では、スリーブなしノズルとの違いとして主に針弁開時の初期の急激な流体力変化を抑制することが示めされ、著者の指摘の妥当性を裏付けている。

第5章では本論文の成果をまとめて考察している。特に、顕著な成果として、①ガソリンエンジン用スワールノズルの噴霧しぼみ現象メカニズムを解明し、②テーパ付ノズルによる改善効果を示したこと、③ディーゼルエンジン用マルチホールノズルの噴霧ばらつきの現象メカニズムを明らかにし、④スリーブ付ノズルによる改善効果を示したことが挙げられる。

上記のように本論文は、直接噴射式エンジンの噴射弁と噴霧形成メカニズムの解析のための実験計測および数値シミュレーション法を開発し、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンにおいて顕在化している課題を解明するとともに、それらの改善設計に対しての合理的な原理機構を示した。これら点から、機械工学、特に自動車工学の発展に寄与するところが大きいといえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。